



部分還元焼結鉱の製造技術および品質の評価

佐藤 秀明*・町田 智*・主代 晃一*・市川 孝一*
佐藤 道貴*・有山 達郎*²・武田 幹治*

Development of Production Process for Pre-reduced Agglomerates and Evaluation of Its Quality

Hideaki SATO, Satoshi MACHIDA, Koichi NUSHIRO, Koichi ICHIKAWA, Michitaka SATO, Tatsuro ARIYAMA and Kanji TAKEDA

Synopsis : To achieve the greatly decrease in CO₂ emission at iron making process, the production process of the pre-reduced agglomerates (the following: PRA), which are partially reduced simultaneously with agglomeration of iron ore on the existing sintering machine, was proposed. In this paper, the basic studies to produce PRA examined with the test pot and the results of estimations for using PRA as the main raw material of blast furnace were described. At the basic studies, the optimum conditions for producing PRA such as the particle size of coke as reducing agent, the structure of quasi-particles and the oxygen concentration in suction gas during sintering were examined. Then the maximum reduction degree of 40% was achieved for the PRA made from quasi-particles produced by tumbling granulation. Moreover the possibility of attaining reduction degree of 60% was confirmed for the PRA made from briquettes as raw material particles. Whereas it became obvious that prevention of generating excess melt caused by the disintegration of quasi-particle or briquette was indispensable. From the results of estimations to use PRA at blast furnace, the pressure drop in blast furnace was confirmed to decrease as compared with usual sintered ore, and the permeability in blast furnace was improved as the reduction degree of PRA was increased.

Key words: pre-reduced agglomerates; sintering process; quasi-particle; briquette; reduction degree; metallic Fe.

1. 緒言

2005年の京都議定書発効に伴い、我が国の最終エネルギー消費の11%強を占める鉄鋼業では、エネルギー使用量削減、二酸化炭素排出抑制を目指した自主行動計画に基づき持続可能な社会の構築に向け活動を展開中である¹⁾。このような背景下、製鉄所のエネルギー最大使用部門である製鉄工程では、二酸化炭素排出量の抜本的削減を可能とする技術開発が望まれている。

我が国の一貫製鉄所の製鉄工程は高炉、焼結機、コークス炉からなり、緊急性の高い二酸化炭素の大幅削減に対しては、これら既存の設備を最大限有効利用することが望ましい。著者らは、既存の製鉄工程を活用し、焼結工程において、塊成化機能に還元機能を付加し一部を金属鉄まで還元した部分還元焼結鉱 (Pre-Reduced Agglomerates: 以下PRA) を製造し、PRAを高炉で使用することで製鉄工程トータルでの二酸化炭素排出削減を実現するプロセスを提唱している²⁾。即ち、塊成化工程に還元材としての炭素源を添加し、高温焼成時に鉄鉱石の部分的な還元を施し、高炉側還元材比を大きく削減しようとする考えである。マクロ的には酸化雰囲気の中で焼結機の生産性を維持しながら部分的な還元を達成することが課題となる。

従来、酸化鉄の一部を金属鉄にまで還元したPRA製造

の基礎研究は多くの研究者により行われている。Sharma³⁾とMisra, Gupta⁴⁾は、空気中で炭材内装ペレットを加熱し部分還元ペレットの製造を検討した。彼らの報告では、炭材を内装した内核と炭材を含有しない外殻の二層構造ペレットを静止した大気雰囲気中で加熱し、内部で発生したCOにより外殻の酸化鉄をも還元して部分還元鉄を製造することを試みた。1473Kで最高約90%、1323Kで最高約44%の還元率を得ているが、ペレットはルツボ内で加熱されておりペレットと空気の接触状態には言及されていない。

井口⁵⁾らは、炭材内装ペレットから発生した還元ガスの燃焼熱をその加熱に利用することを想定し、酸素含有ガス中に置いた単一ペレットの熱炭素還元について報告している。ヘマタイト鉱石と石炭チャー (いずれも150 μm以下) の混合粉ペレットを使用し、N₂-O₂ (30 vol%) のガス流通下で還元率の測定を行った。ペレット径10 mmの場合は1300°Cで約23%、18 mmの場合は、1150および1200°Cで約25%の最大値を示したことを報告している。

いずれの研究も、従来の還元鉄製造とは異なるペレット構造、また雰囲気の中で部分還元鉄を得ようとするもので筆者らの想定するプロセスと共通点もあるが、プロセス的な展開にまで至っていない。

本研究では、二酸化炭素大幅削減を目指し、既存焼結機

平成18年4月27日受付 平成18年7月24日受理 (Received on Apr. 27, 2006; Accepted on July 24, 2006)

* JFEスチール (株) スチール研究所 (Steel Research Laboratory, JFE Steel Co., 1 Kokan-cho Fukuyama 721-8510)

* 2 東北大学多元物質科学研究所 (Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University)

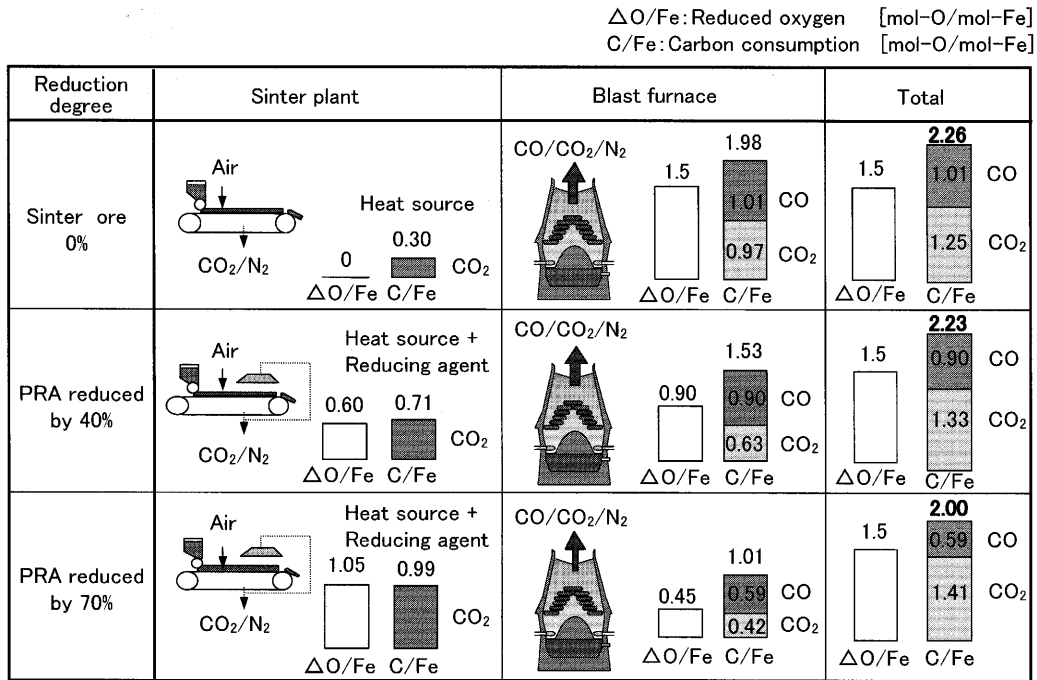


Fig. 1. Relationship between C consumption and reduction degree of PRA.

を利用したプロセスを前提としてPRA製造の課題を整理し、高還元率の達成と効率的生産を可能とする方法について、原料粒子の製造条件及び焼成時の雰囲気制御に関し検討を行った結果を報告する。また、製造したPRAの高炉内挙動を含む品質の評価結果についても合わせて報告する。

2. PRA 使用による炭酸ガス削減効果

Fig. 1は、焼結～高炉工程において、通常の焼結鉱を製造し高炉で使用する場合と一定の還元率まで還元されたPRAを製造し高炉で使用する場合とで必要となるCの量(即ちCO+CO₂ガス発生量)を比較したものである²⁾。焼結機の凝結材単位は、2000年の国内焼結機平均値46kg/t-sinter(粉コークス:35+無煙炭:11)を使用し、焼結系内で発生したCOはCO₂まで燃焼されると仮定した。また、高炉における還元材比の計算には、T.Fe=59%の通常焼結鉱を100%使用した場合の主原料比を1600kg/thmとし、この焼結鉱を還元率40%、70%のPRAと全量置き換えた場合のC使用量を高炉の熱物質収支モデルを用いて計算した。

Fig. 1より、CO、CO₂ガスの平衡制約が存在する条件下で間接還元を行う現状の焼結～高炉プロセスに比較し、ガス反応の平衡制約を受けない焼結機上での直接還元により還元率を高めたPRAを高炉で使用するほど、焼結機での必要C量は増加するが、逆に高炉では必要還元材比が大幅に低下し、焼結～高炉工程トータルで必要C量が低減できることが推察される。また、C削減効果は、還元生成物と

Table 1. Chemical composition of raw materials (mass%).

	T.Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Free C	
Iron ore	67.97	1.30	0.48	0.02	0.04	-	Pellet Feed
Lime stone	0.09	0.49	0.16	54.89	0.51	-	
Burnt lime	-	-	0.17	95.43	1.67	-	
Dolomite	-	3.02	0.81	8.22	38.60	-	
Coke	-	5.88	3.00	-	-	87.10	Dust at CDQ

してFeOが主体である還元率が40%までは効果が小さく、還元率が40%を超えPRAに金属Feが大量に生成する領域で大きくなるのが分かる。従って、焼結機上でいかに還元率を高め、金属Feを大量に含有するPRAを製造するかが重要となる。

3. 転動造粒擬似粒子によるPRA製造の検討

3.1 実験方法

実験に使用する原料は、鉄鉱石として高品位ペレットフィードを使用し、成分調整用副原料(石灰石、生石灰)の粒度も特に断らない限り1mm以下のものを用いた。炭材についても粒径1mm以下のCDQ集塵微粉コークスを使用し、必要に応じて所定粒径に調整して使用した。Table 1に各原料の化学成分の分析値を整理した。

Table 2に示すように、各原料を所定量ドラムミキサーで乾式混合した後、ディスクペレタイザーで水分量が10.0~11.0mass%となるように加湿しながら造粒して内核粒子を形成した後、内核粒子表面に所定量の熱源用コークスを被覆造粒し、Fig. 2に示される二層構造擬似粒子(粒

径 $\phi 8\sim 11$ mm)を作成した。

焼成試験は、主に、径260mm、高さ450mmの焼成鍋を用いて、グレート上に床敷鉍(実機焼結鉍、粒径:10~15mm)を50mm厚で装入し、その上に造粒した擬似粒子を300mm厚で充填(一回当たり約30kg)して行ったが、焼成状況を観察する際には、径150mm、高さ450mmの石英製鍋に擬似粒子を300mm厚で充填して焼成を実施した。

Table 2. Experimental conditions for granulation and pot tests.

(a) Blending ratio of raw materials.

Pellet feed (mass%)	92
Burnt lime (mass%)	8
Coke (mass%)	Inner: 6~15 Coating: 3

(b) Mixing and granulating conditions.

Mixing	Apparatus Time	Drum mixer (0.65m ϕ) 3min
Granulating and coating	Apparatus	Disk-pelletizer (1.3m ϕ)
	Time	5min(Granulating),3min(Coating)
	Additional moisture Particle size	10~11mass% 8~11mm ϕ

(c) Sintering conditions for pot test.

Pot size	$\Phi 260$ mm x 450mmH, 30kg/batch
Bed height	300mm
Ignition	Propane, 120sec, -4kPa
Suction gas	Air, Air+N ₂ (6~21O ₂ vol%)
Suction press.	-6kPa

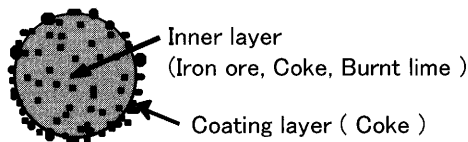


Fig. 2. Basic structure of quasi-particle.

焼成条件として、点火は、吸引圧4kPaでプロパンバーナーにより充填層上部表面を120秒間加熱して行い、ベッド上面の到達温度が900~1100°Cとなるようにした。その後、吸引圧は焼成終了まで6kPaで保持した。

吸引ガスは、大気およびコークスの燃焼制御と再酸化防止を目的に行った試験では、窒素で希釈し酸素濃度を低下させたガスで試験を実施した。また、焼成末期、排ガス温度がピークとなった時点までの時間を焼成時間とした。

3.2 焼結機におけるPRA製造時の課題

Fig. 3は、Fig. 2に示した擬似粒子でコークス総添加量を5mass%とし通常焼結鉍を焼成する場合と、PRA製造のため内核粒子のコークスを12mass%まで増やし総添加量を15mass%として大気により焼成した場合の、燃焼・溶融帯が原料充填層内を降下する状況を比較したものである。コークスを15mass%まで増加した場合は、充填層内のヒートパターンおよび排ガス温度がピーク温度を示す時間、即ち焼成速度に遅れが認められ、また酸化鉄のカーボンによる還元反応が吸熱反応であるにもかかわらず燃焼・溶融帯の幅が大きく広がり、赤熱帯の輝度も高い。焼成後の試料には、原料が激しく溶融した部分が大量に存在していた。

この状況は、PRAでは、還元用に添加したコークスの燃焼及び一旦還元された金属FeおよびFeOの再酸化による過剰な発熱のため原料の溶融および冷却遅れが起こったものと考えられる。

従って、PRAの製造では、還元用コークスの燃焼および還元生成物の再酸化に伴う過剰な発熱による原料の溶融を防ぎ、高還元率達成と共に焼成速度即ち生産性を維持することが重要な課題となる。この課題に対しFig. 2に示した二層構造擬似粒子を基本構造として種々の対策を検討した。

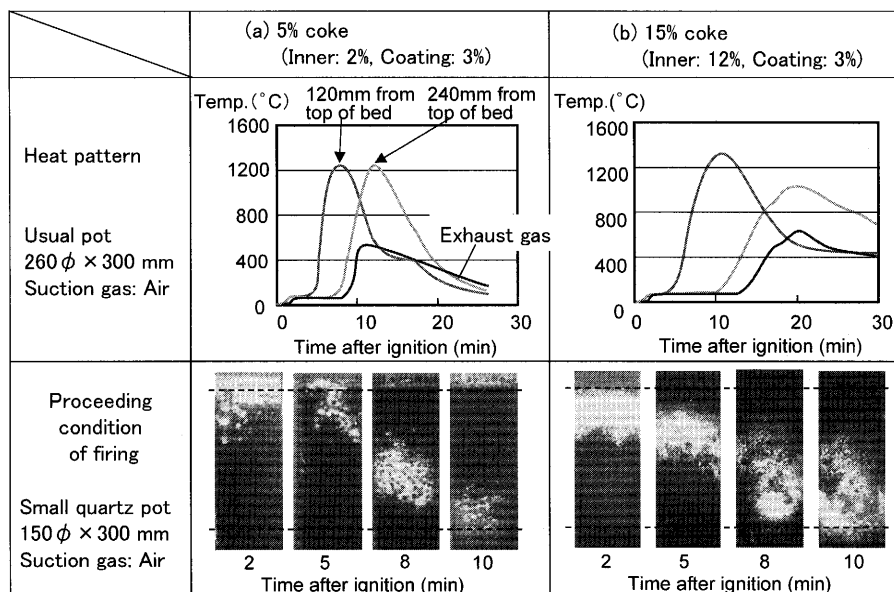


Fig. 3. Influence of coke amount on sintering process.

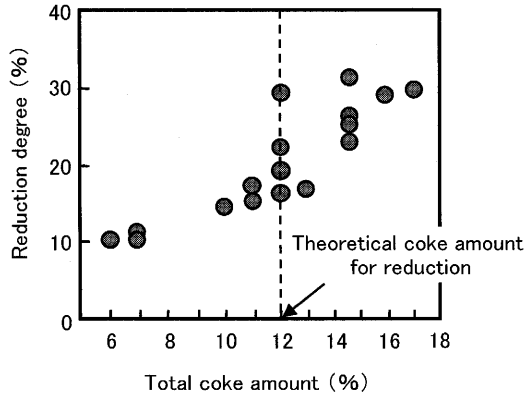


Fig. 4. Relationship between total coke amount and reduction degree.

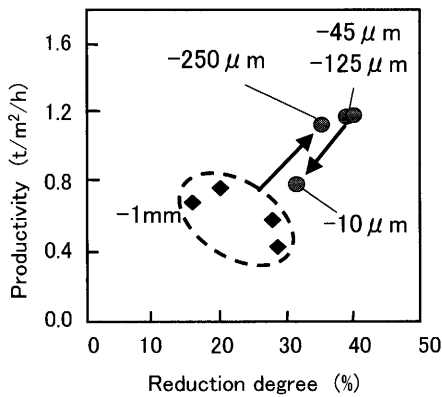


Fig. 5. Influence of coke size on reduction degree and productivity.

3.3 還元率および生産性改善技術の検討

3.3.1 粉コークス粒度の最適化

Fig. 4は、コークス添加量を変えた大気焼成試験で得られたコークス総添加量と還元率の関係を示す。コークス添加量12mass%は、鉄鉱石を100%還元するのに必要な化学量論コークス量である。Fig. 4で還元率の値にばらつきはあるがコークス量の増加に伴い還元率も増加する傾向が認められる。しかし、コークスを12mass%以上添加しても還元率の大幅な向上は認められず、一方で、著者が既に報告⁶⁾したように、還元率が高くなると生産性が大幅に悪化する問題が認められた。

還元率をさらに向上させるには、コークスと鉄鉱石の直接還元を促進するため両者の接触面積を増加させることが有効であり、還元用コークスの微細化を検討した。

Fig. 5は、内核粒子に添加する還元用コークス粒度を1mm, 125 μ m, 44 μ m, 10 μ mの各サイズ以下とした場合のPRA還元率と生産率の関係を示す。いずれも内核粒子中コークス量が12mass%、外装コークス(1mm以下)の添加量を3mass%とし大気焼成した場合の結果である。Fig. 5より、還元率は125 μ m以下と44 μ m以下の間で最大となり、また、生産率も同じ粒度範囲で最大となった。一方で、粒子径を10 μ m以下まで細かくすると還元率、生産率とも

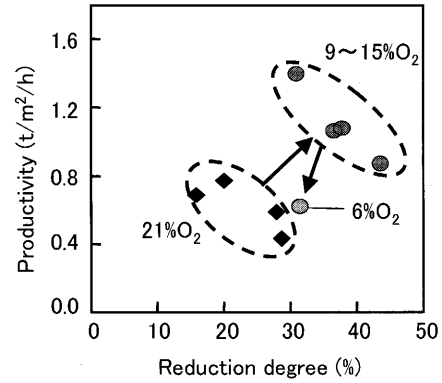


Fig. 6. Influence of oxygen concentration in suction gas on reduction degree and productivity.

低下し、また、焼成後の試料では、溶融が一番激しく起こった状況が認められた。これは、極端に微細化したコークスの使用により、最初、還元反応が急激に進行し、発生したガスの圧力によって内核粒子に亀裂の発生あるいは粒子の崩壊が起こり、内核粒子中のコークスが急激に燃焼し原料の過剰な溶融が起こったものと推察される。

この結果から、鉄鉱石との接触を改善し安定に還元反応を進めるコークス粒度としては、125 μ m以下~44 μ m以下程度の粒度が適性と考えられた。

3.3.2 酸素分圧制御の効果

擬似粒子内で発生したガスにより擬似粒子の形状が崩れ内核粒子内コークスが燃焼し一旦原料の溶融が起ると、その下層側では内核粒子中の還元用コークスの燃焼と原料の溶融がさらに激しくなる。

内核粒子中の還元用コークスの継続した燃焼を防ぐには、焼成ガス中の酸素濃度を低減させることが有効と考えた。しかし、一般に通常の焼結工程では、焼成ガス中の酸素ガス濃度を下げた場合には、生産性の低下につながる。

そこで、PRAを製造する場合に、内核粒子中の還元用コークスの継続燃焼を防止し、還元率向上と生産性の確保を両立する焼成ガス中の酸素ガス濃度を調査した⁶⁾。結果をFig. 6に示したが、焼成中の酸素濃度は9~15vol%が適正濃度であり、これ以上では還元用コークスの燃焼による過剰溶融が発生し還元率、生産性とも上がらず、これ以下では充填層内で擬似粒子に外装被覆したコークスの燃焼が継続せず未焼成原料が多量に残留した。

3.3.3 擬似粒子構造の検討

擬似粒子内核粒子中の還元用コークスが燃焼し粒子内で生成した融液が粒子外部に流れ出し原料充填層全体が溶融するのを防止する目的で、Fig. 7に模式図を示したように、内核粒子表面にCaO成分や酸化鉄(鉄鉱石)を被覆し、さらにその外側に熱源用コークスを被覆した三層構造擬似粒子によるPRAの製造を検討した⁷⁾。Fig. 7で(1)は、Fig. 2に示した均一型二層構造擬似粒子であり、(2)のCaO成分被覆型では、造粒に必要な最低量の生石灰2mass%を内核

粒子に配合した以外はすべて外装被覆した。(3)の酸化鉄外装型は、鉱石として使用したペレットフィードの2/3を内核粒子に混合し、残り1/3を外装被覆した。生石灰は、(2)の場合とは逆に、酸化鉄外装に必要な量2mass%以外はすべて内核粒子に配合した。(3)の場合被覆層の厚さは1.5~2.0mmであった。この場合の擬似粒子全体での原料使用割合は、3種類とも鉄鉱石92mass%、生石灰8mass%、内核粒子中の還元用コークスは12mass%、最外面への被覆コークスは3mass%とした。

Fig. 7に示した3種類の構造の違う擬似粒子を用いて大気により焼成した鍋試験の結果をFig. 8に示した。Fig. 8より、(1)原料を均一混合した内核粒子にコークスを被覆した二層構造粒子に対し、(2)CaOおよび(3)酸化鉄被覆粒子で還元率が向上し生産性も大きく改善されている。また、CaOの被覆に比べ酸化鉄の被覆効果が大きい。

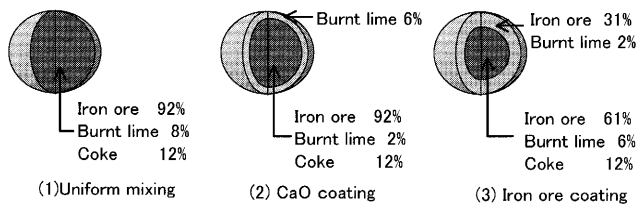


Fig. 7. Schematic drawing of quasi-particle structures (blending ratio: mass%).

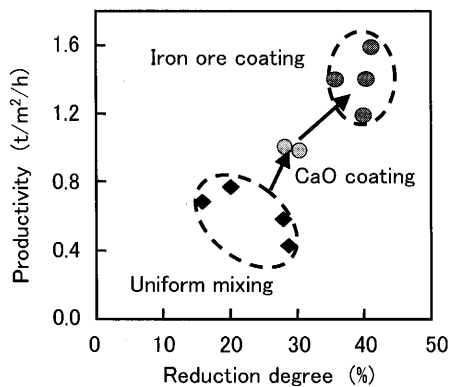


Fig. 8. Influence of quasi-particle structure on reduction degree and productivity.

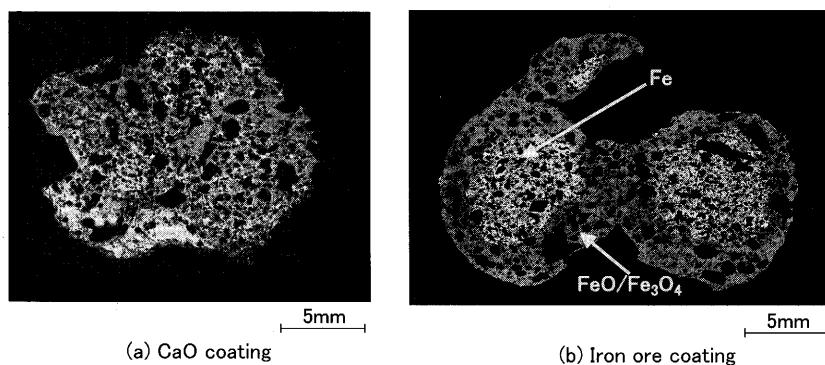


Fig. 9. Comparison of sinter structures made from CaO coating quasi-particle and iron ore coating one.

Fig. 9は、(a) CaO外装型および(b)酸化鉄外装型の擬似粒子を用いて製造したPRAの組織写真を示す。白い部分が金属鉄、黒い部分が気孔、グレーの部分がFeOを主成分とする鉱物相である。(a)のCaO被覆型では金属鉄は焼結鉄全体に分散しており表面付近にも生成している。これに対して、(b)の酸化鉄被覆型では、焼成後も擬似粒子の形状が比較的保たれており、擬似粒子の内核粒子部分に金属鉄の生成が集中し、その外側にはFeOを主成分とした鉱物の被覆層が形成されている。

この被覆層により金属鉄の再酸化が抑制され、還元率の改善が図られた可能性も考えられたため、酸化鉄被覆型粒子を用いて、前述した石英製鍋により原料充填層(300mm)のほぼ中間位置まで焼成が進んだときに、常温の窒素ガスを吹込むことで焼成を中断する試験を実施し再酸化抑制効果を確認した。

Fig.10は、焼成を中断し冷却後取り出した焼結ケーキの高さ方向に沿って化学成分を分析した結果を示している。燃焼帯の上層位置付近で金属化率、還元率は、最高の値を示した。一方で、燃焼帯の上方及び下方位置では、金属化率、還元率とも低下している。燃焼帯下方位置ではカーボンもまだ十分残留しており、これから塊成化および還元反応が始まることを意味している。燃焼帯の上方位置の金属化率、還元率の低下は再酸化によるものと考えられる。

しかし、今回の焼成中断試験の結果より推定される再酸化量は2~4%であり、従来の他の研究者の報告値⁸⁻¹⁰⁾と比べ再酸化の程度が極めて小さく、また、Fig. 9の組織観察結果からは、粒子表面の被覆層には多数の粗大開気孔や亀裂も認められ、吸引ガス中酸素の侵入を効果的に防止したとは考え難い。

以上の理由から、酸化鉄被覆型擬似粒子において40%を超える還元率で生産性が向上したのは、再酸化防止効果よりも内核粒子に含まれる還元用コークスの過剰な燃焼が抑制され、安定した還元および塊成化反応が継続した効果が大きいものと考えられる。

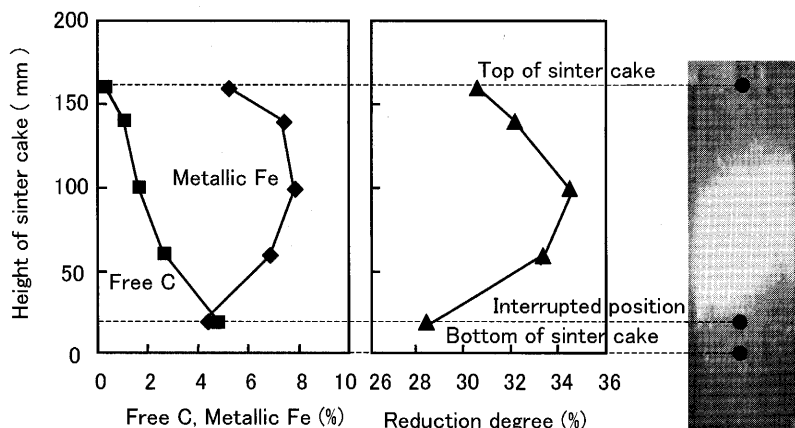


Fig. 10. Free C, metallic Fe and reduction degree of PRA along the height of sinter cake at the interrupted pot test.

4. 圧縮成形粒子（ブリケット）によるPRA製造の検討

4.1 ブリケット利用の考え方

上述したように、転動造粒法で製造した多層構造擬似粒子によるPRAの製造で安定して得られた還元率は、最大40%程度である。しかし、2章で説明したように、還元率40%のPRAによるCO₂削減効果は小さく更なる還元率の向上が必要である。還元率が40%から大きく改善できない最大の原因は、焼成過程で内核粒子に添加された還元用コークスが燃焼すると、低融点のFeO系融液が大量に発生し、焼結充填層内通気性に著しい不均一を生じさせるためである。粒子内部への酸素の侵入を防ぐには、還元反応により生じたガスにより粒子が崩壊せず焼成後もその形状を維持可能とするより強固な原料粒子を作り込む必要がある。

そこで、鉄鉱石、副原料及びコークスの強固な接触を可能とする方法として、原料を圧縮成形するブリケットを用いる方法を考えた。

さらに、年間300万~700万tの生産を行う実焼結機への適応を考えた場合、全原料のブリケット化は、ブリケットの成型効率を考慮すると莫大な設備が必要となるため困難であり、また、ブリケット100%の充填層では空隙の割合が大きく通気が過剰に成り過ぎること、ブリケット内部で酸化鉄の還元を進めるには外部から熱を供給する必要があること等の理由から、Fig.11に示されるように通常の焼結擬似粒子充填層の中にブリケットを所定割合添加混合して焼成し、ブリケット部分のみを高還元率のPRAとすることを考えた。

4.2 ブリケットによるPRA製造試験

ブリケットとしては、アーモンド形状のものを用いた。Fig.12に試験に使用したブリケットの外観写真及びサイズを示した。原料配合は、生石灰の代わりに石灰石を用い、また鉄鉱石と石灰石に対するコークスの添加量は、前述した転動造粒擬似粒子と同じ12mass%とした。また、パイ

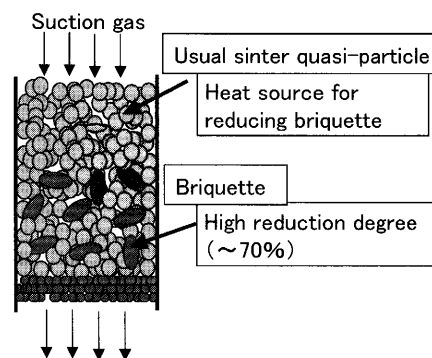


Fig. 11. Concept of raw material packed bed for producing PRA with briquette.

ンダーとして強固な結合を可能とするα化デンプンを添加した。ブリケット成型時には、ロールに9.8N/cmの線圧を加えながら所定の大きさに成形した。

Fig.13は、サイズが比較的近い転動造粒擬似粒子(φ8~11mm)とブリケット(1.2mL)の見掛け密度と圧壊強度を比較したものである。転動造粒擬似粒子は、造粒直後のものは強度が低く測定精度に問題があったため、Fig.13では乾燥後粒子で比較を行った。見掛け密度、圧壊強度ともブリケットが大きく、特に圧壊強度は10倍以上の値となり十分な強度を有すると考えた。

ブリケットとして容積1.2mLに成形したものを、通常処理された焼結原料(粉コークス4%添加)中に10mass%添加して焼成したブリケットの断面写真をFig.14に示す。写真より、焼成後もブリケットの原型は維持され白色の金属鉄も粒子内で均一に生成している事が分かる。

Fig.15は、種々のサイズのブリケットを焼結原料中に15mass%添加混合して焼成した焼結ケーキから十分に焼成の進んだブリケットを採取し、ブリケット単体部分の分析値から求めた金属Fe化率と還元率の関係を、転動造粒擬似粒子を焼成して製造しPRAの値と比較して示したものである。ブリケット単体の分析値は、転動造粒擬似粒子を焼成して得られたPRAの金属Fe化率、還元率の相関の外挿線上にあり、転動造粒粒子では達成できなかった高還

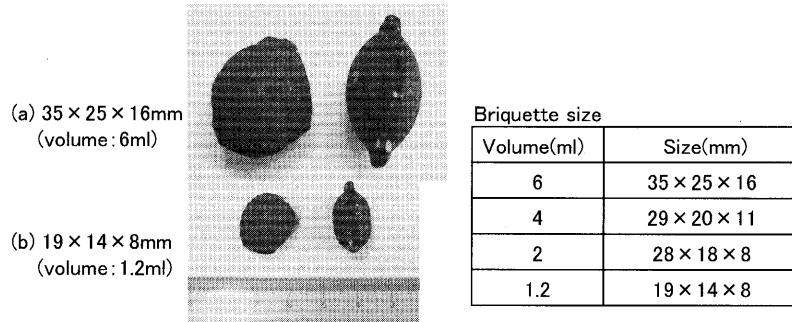


Fig. 12. Photographs of appearance and size of briquettes used at the tests.

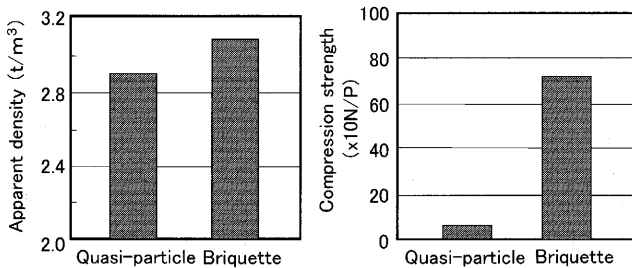


Fig. 13. Comparison of apparent density and compression strength of dried samples (quasi-particle: φ8~11 mm, briquette: 1.2 mL).

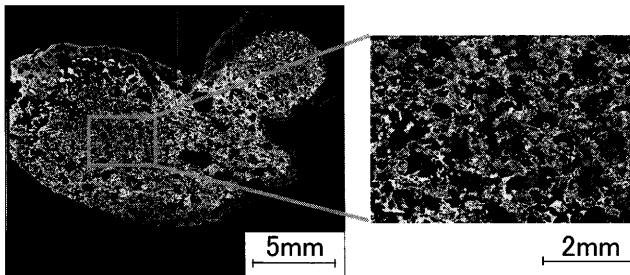


Fig. 14. Structure of briquette after sintering with usual sinter particles.

元率（最大60%、金属化率48%）の値も得られておりPRA製造用原料粒子として有望であると考えられる。

しかし、Fig.16に模式図を示すように、焼結ケーキ内のブリケット採取場所の違いによりブリケットの焼成状態および還元率にはばらつきが見られ、焼結ベッド上層及び鍋の側壁近傍に装入されたブリケットには未焼成のまま残留するものが多く、一方、焼結ベッド下層に装入されたものには熔融消失したのも認められた。未焼成で残るものはサイズの大きい6mLを使用した場合に多く、熔融消失したものは2mL以下のブリケットを使用した場合に顕著に認められた。

そこで、焼結原料中におけるブリケットの焼成挙動をFig.17に示すX線CTホットステージ¹¹⁾により観察した。Fig.18は、焼結原料中に置かれた6mLおよび2mLのブリケットのX線CT画像を時系列的に示したものである。Fig.18より焼結原料の焼成がブリケット近傍まで進み対流

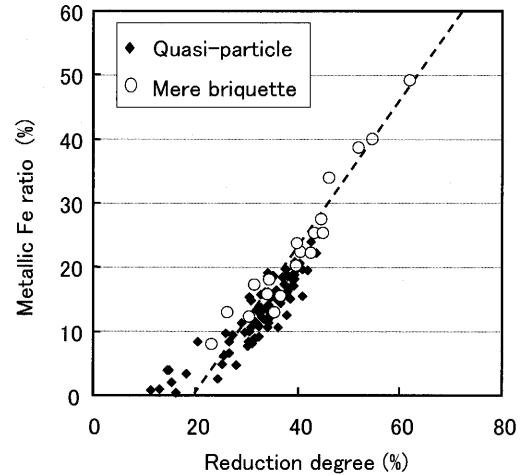


Fig. 15. Relationship between reduction degree and metallic Fe ratio in PRA and mere briquette.

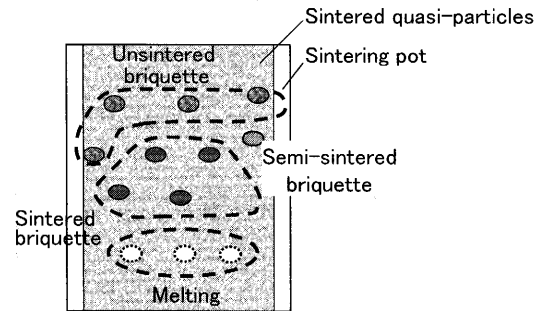


Fig. 16. Schematic drawing of uneven sintering conditions of briquettes dependent on the location in pot bed.

伝熱と輻射熱によりブリケットが加熱されると、還元反応に伴い発生するガス圧により、ブリケットに亀裂が入るが、サイズの大きい6mLのブリケットでは、中心部が反応温度に達するまでの伝熱に時間がかかるため中心部が還元反応温度に到達する前に冷却が始まり、亀裂が大きく進展することなく焼成が終了する。これに対して2mLのブリケットでは、表面の温度とブリケット中心部の温度差が小さく、還元がブリケット内部でもほぼ同時に進行するため、発生したガスによりブリケットが膨張し、更にはブリケットの下部が脱落し熔融消失してしまう状況が認められた。

以上の結果から、PRA製造用原料としてブリケットを利用するプロセスを確立するためには、焼結原料中でプリ

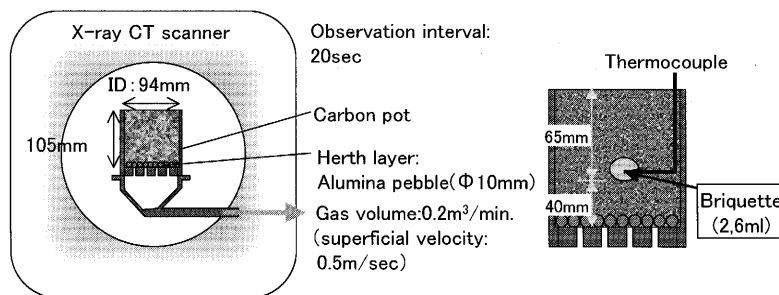


Fig. 17. Schematic illustration of X-ray CT hot stage observation and location of briquette in the pot.

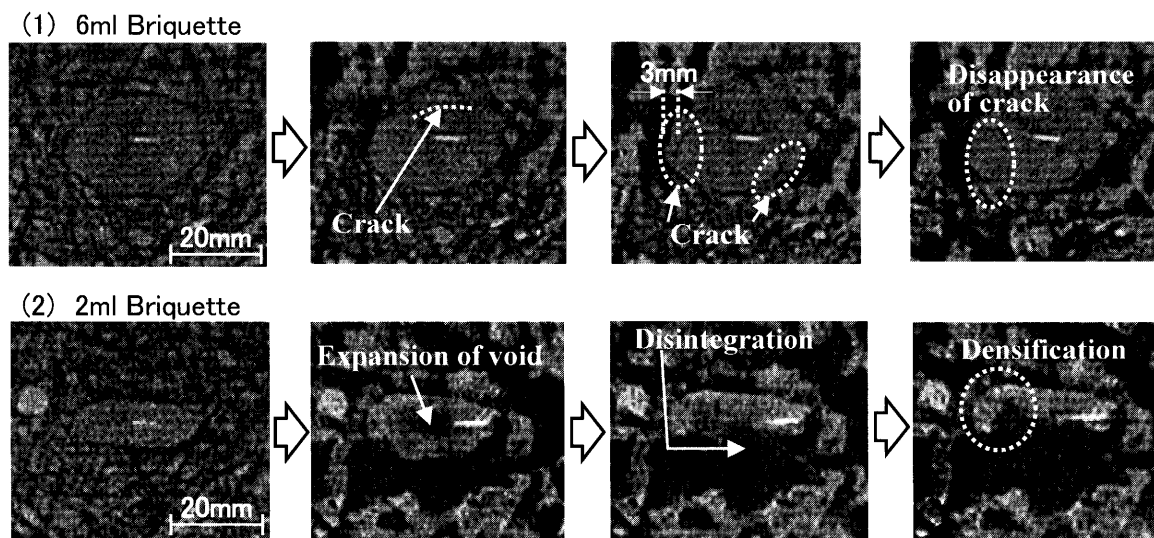


Fig. 18. Sintering behavior of briquettes by X-ray CT scanner observation.

ケットの受ける熱履歴のコントロール、伝熱特性を考慮したブリケットのサイズおよび添加量、原料充填層内装入位置の最適化等の検討が今後必要になると考える。

5. PRAの高炉使用時の評価

5.1 評価方法

PRAの高炉内挙動を調査するため、高炉内の温度、雰囲気および荷重条件を模擬した装置により荷重軟化試験を実施した。また、高炉内での軟化・溶融・溶け落ちの際の圧力損失を評価するために温度-圧力損失および温度-収縮率の2つの特性曲線より高炉内における焼結鉱の物理的(変形)挙動および溶け落ち温度および充填層の圧力損失について検討した。

5.2 試験装置

本装置はφ70×150mmの黒鉛のつぼ、またはアルミナのつぼ内へ焼結鉱を充填し、所定温度に予熱された還元ガスと外熱式のヒーターにより最終的に1600°Cまで昇温し、軟化、溶融および溶け落ち挙動が測定可能である。高炉内での原料の降下に伴う温度及びガス組成はプログラム制御し、昇温過程では、温度保存帯についても考慮した。試験に使用した装置および試験条件の概略をFig.19に示した。

試料の粒度については、壁効果を低減し、ガス流れがらつば平面内で均一となるよう実際の焼結鉱の約1/2とした。

5.3 試験結果

Fig.20に荷重軟化試験の試験結果を実機焼結鉱と比較して示した。図の下段は炉内温度に対する圧力損失を示し上段は収縮率を示す。PRAは3章で述べた擬似粒子より製造したものを用いた。PRAに対し実機の焼結鉱での軟化・収縮は100°C程度低温で生じ、また、収縮することにより試料層の空隙率が低下し、圧力損失が上昇することが分かる。高炉での使用を考慮すると圧力損失の小さいPRAを用いることが望ましい。さらに、実機焼結鉱では1150°C以降ゆるやかに収縮が起こるため圧力損失も高くなっている。1400°Cを超えると急激に収縮して溶け落ちその後は低下している。

一方、PRAでは1400°Cまでの収縮は相対的に小さく圧力損失も小さい。比較的低温の1400°Cで速やかに収縮して溶け落ち後圧力損失が低下するため、高温性状としては優れているものと言える。収縮開始温度は高炉の融着帯の上端部に、溶け落ち温度は融着帯の下端部にそれぞれ対応すると考えられるため、PRAの高炉使用時には、高炉の圧力損失の大半を占める融着帯の厚みが薄層化し圧力損失が低減され、高炉の生産性向上に大きく寄与するものと期

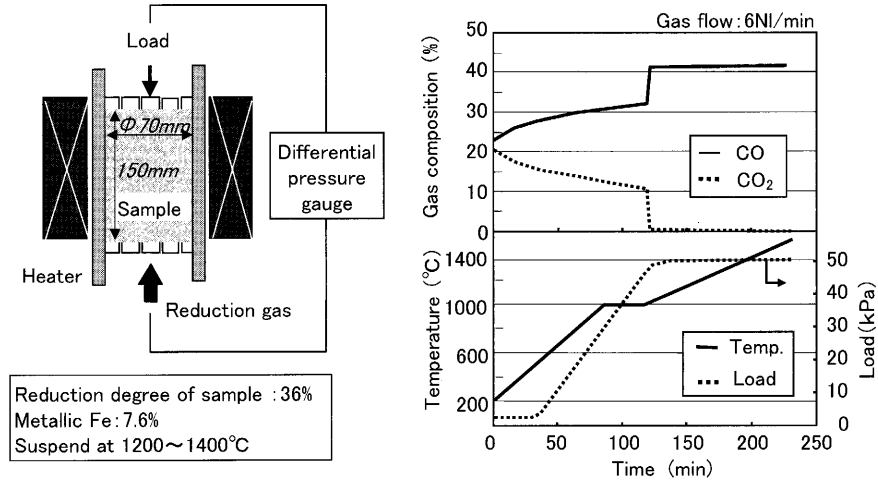


Fig. 19. Experimental equipment and conditions of softening under load test.

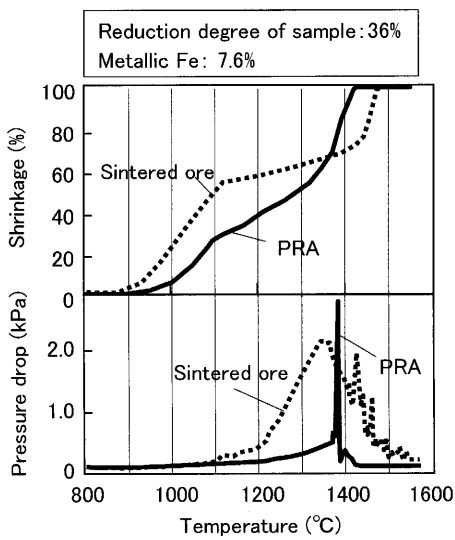


Fig. 20. Results of softening under load test.

待される。

Fig.20下段の図において、炉差圧の曲線と横軸で囲まれた部分の面積は、焼結鉄が軟化・溶融して溶け落ちを完了するまでの通気抵抗に相当する量であり、この面積をS値と定義して焼結鉄の評価が試みられてきている¹²⁾。S値が小さいほど高炉内部で軟化・溶融する際の通気抵抗が小さく、高炉使用に適した原料であると評価が可能である。そこで、還元率とS値の関係をFig.21に示す。前述の通り実機焼結鉄と比較してPRAの圧力損失低減効果が確認されているが、還元率が上昇するにつれてS値すなわち高炉内の通気抵抗が減少することが明らかとなった。

6. 結論

PRAの製造技術および高炉内挙動について検討を行い以下に示す結果を得た。

- (1) 鍋試験による基礎検討では、原料条件、造粒条件、

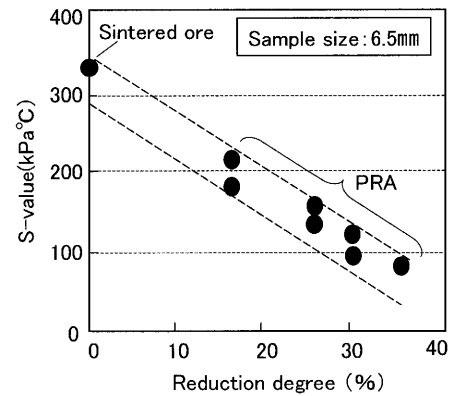


Fig. 21. Relationship between reduction degree and S-value.

及び焼成条件について検討し最大40%の還元率が得られることが分かった。また、原料を加圧成形したブリケットを利用し、通常焼結に混合して焼成しPRAを製造した場合には、ブリケット単体で還元率は60%（金属化率48%）まで到達することを確認した。

- (2) 高還元率でかつ生産性を維持してPRAを製造するためには、還元用に添加したコークスの過剰な燃焼及びそれに伴う原料溶融の防止が必須であり、原料粒子として強固なブリケットの利用が有望である。

- (3) PRAの高炉内挙動の評価では、通常焼結鉄より圧力損失低減が確認され、還元率の上昇に伴い通気抵抗が減少することが分かった。

- (4) 既存焼結機をベースとして高還元率のPRAを安定生産する方法として、焼結原料中にPRA製造用ブリケット粒子を混合した複合原料粒子を用いる方法が有望であり、今後、複合原料充填層の構造設計に関し詳細な研究が必要である。

本研究はNEDO「課題設定型産業技術開発費助成事業(CO₂排出抑制型新焼結プロセスの開発)」により実施された。

文 献

- 1) 鉄鋼界, 日本鉄鋼連盟編, No. 9, 52 (2002), 3.
- 2) 佐藤秀明, 町田 智, 主代晃一, 市川孝一, 大山伸幸, 佐藤道貴, 有山達郎: 新鉄源プロセスの最近の動向と環境対応技術, 日本鉄鋼協会編, 札幌, (2003), 52.
- 3) T.Sharma: *Ironmaking Steelmaking*, **19** (1992), 372.
- 4) S.N.Misra and C.Gupta: *ISIJ Int.*, **33** (1994), 468.
- 5) Y.Iguchi and R.Kamei: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 439.
- 6) S.Machida, H.Sato, K.Nushiro, K.Ichikawa, N.Ooyama, M.Sato and T.Ariyama: *CAMP-ISIJ*, **17** (2004), 810.
- 7) S.Machida, H.Sato, K.Nushiro and T.Ariyama: *CAMP-ISIJ*, **18** (2005), 927.
- 8) T.Kitajima and E.Kasai: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 245.
- 9) T.Kitajima and E.Kasai: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 246.
- 10) 大友崇徳: 新鉄源プロセスとの最近の動向と環境対応技術, 日本鉄鋼協会編, 札幌, (2003), 61.
- 11) K.Nushiro N.Ooyama, K.Ikawa, K.Sorimachi, T.Uetake: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 822.
- 12) Y.Shimomura, Y.Kushima, Y.Okikawa, S.Arino, T.Nakata and H.Yoshida: *Tetsu-to-Hagané*, **65** (1979), S571.